第65卷 第6期 天 文 学 报 Vol. 65 No. 6
2024年11月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Nov., 2024

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2024.06.001

基于CEEMD-SSWT对太阳南北半球Rieger-type周期的不对称性分析*

卢 煊[1] 薛雅娟[1†] 邓林华[2]

(1 成都信息工程大学通信工程学院 成都 610200)
(2 云南民族大学数学与计算机科学学院 昆明 650000)

摘要 CEEMD (Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition)是近年提出的一种自适应滤波算法, SSWT (Synchrosqueezed Wavelet Transform)是目前的一种高分辨率时频分析算法. 采用CEEMD对太阳黑子日面积数据进行预滤波处理, 再利用SSWT进行太阳南北半球Rieger-type周期不对称性分析, 实现对太阳周期信号更精确的提取. 研究结果表明: (1)虽然整个北半球的活动强度要高于南半球, 但其整个13个活动周的Rieger-type周期信号的平均周期尺度却是极其相近的; (2)南北半球的太阳活动强度明显不对称, 但在大部分活动周中, 在太阳活动的极大期也是南北半球太阳活动不对称性最弱的时期; (3)太阳活动的强度与太阳的Rieger-type周期信号平均周期没有明显的相关关系, 并不是在每个活动周中太阳活动强度越高的半球, 所对应的半球Rieger-type周期信号的平均周期就一定越小, 活动强度越低所对应的半球Rieger-type周期信号的平均周期就一定越大; (4) Rieger-type周期通常出现在太阳活动的极大期附近, 但在某些活动周中Rieger-type周期会呈现多次波动, 也会出现在太阳活动的上升期或下降期.

关键词 太阳: 活动, 太阳: 黑子, 技术: CEEMD-SSWT
中图分类号: P182; **文献标识码**: A

1 引言

太阳活动与地球息息相关. 其对地球的磁场、大气都有着很强的影响, 所以对太阳特性的研究也就显得特别必要. 其中太阳南北半球活动的不对称性是天体物理发电机的一个基本特征[1]. Rieger-type周期是在γ射线耀斑中被发现的一个著名的太阳活动周期[2], 大概在150–180 d之间[2–3]. 它具有和太阳南北半球活动相似的特征, 其中包括南北半球的不对称性[4]. 而在对南北半球Rieger-type周期进行不对称性研究时, 通常的传统方法是通过小波分析[5]以及LSP (Lomb-Scargle Periodogram)[6]法提取周期性特征[7]. 小波分析虽然可以有效地对复杂多频天文信号进行特征提取, 但其对Rieger-type周期进行提取时可能会由于相对较弱的环向磁场和扭转振荡的共同影响[8], 导致在局部分析时出现某些太阳活动周中Rieger-type周期不存在的情况. 智能信号处理算法相较于小波分析进行特征提取的优势在于, 智能算法可以适应多种不同的信号类型, 包括周期性和非周期性信号. 对于周期变化

2023-07-10收到原稿, 2023-10-07收到修改稿
*四川省自然科学基金项目(2023NSFSC0258)、云南省基础研究计划项目(202301AV070007)资助
†xueyj0869@163.com

较快或者周期不稳定的信号, 用智能算法能够有效地对太阳周期活动中的周期信号进行提取[9]. 虽然通常用于提取窄带周期信号的EMD (Empirical Mode Decomposition)和CWT (Continuous Wavelet Transform)算法都有着明显的局限性, 但是SSWT通过对小波系数进行重新分配后, 能够更准确地提取信号的瞬时频率和瞬时幅度信息, 从而在信号重构方面具有更好的性能. 相比之下, EMD容易出现模态混叠, CWT可能会出现信号重构不准确或信息缺失等问题[10]. 所以本文利用形态分量分析的思想, 通过结合CEEMD (Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition)和SSWT (Synchrosqueezed Wavelet Transform)两种算法的特性, 先用CEEMD对信号进行模态分解, 然后通过SSWT重构特定频率区间的信号从而提取Rieger-type信号, 再在12–24活动周中, 对太阳南北半球活动的强度和南北半球Rieger-type信号平均周期尺度进行不对称性分析.

2 方法和原理

2.1 CEEMD-SSWT算法

CEEMD作为EMD的优化算法[11], 拥有比EMD更强的抗混叠、抗噪声能力[12]. 此类自适应滤波算法解决了CWT基函数选择困难等问题[13], 其思想是将一多频信号分为多个单频IMF (Intrinsic Mode Function):

$$x(n)=\sum_{m=1}^{k}c_m(n)+r_k(n)\,, \tag{1}$$

其中$x(n)(n=1,2,\ldots,N)$是原始输入信号, $x(N)$代表了第N个IMF所对应的原始信号, k是分解出的IMF的数量, $c_m(n)(m=1,2,\ldots,k)$是相应的模态, $r_k(n)$是残差信号.

首先将正负信号由$x(n)$与其同频的正负高斯白噪声相加所得:

$$\begin{cases}x_{\rm p}(n)=x(n)+e_{\rm q}(n)\,,\\ x_{\rm q}(n)=x(n)-e_{\rm q}(n)\,,\end{cases} \tag{2}$$

其中$e_{\rm q}(n)$代表高斯白噪声, $x_{\rm p}(n)$和$x_{\rm q}(n)$分别代表正负信号.

然后多次对正负信号进行处理, 从而获得含有IMF成分的序列:

$$\begin{cases}x_{\rm p}(n)=\sum\limits_{m=1}^{k}c_{{\rm p}m}(n)+r_{{\rm p}k}(n)\,,\\ x_{\rm q}(n)=\sum\limits_{m=1}^{k}c_{{\rm q}m}(n)+r_{{\rm q}k}(n)\,.\end{cases} \tag{3}$$

最终通过CEEMD分解的结果是:

$$\begin{cases}c_m(n)=\dfrac{c_{{\rm p}m}(n)+c_{{\rm q}m}(n)}{2}\,,\\ r_k(n)=\dfrac{r_{{\rm p}k}(n)+r_{{\rm q}k}(n)}{2}\,,\end{cases} \tag{4}$$

其中$c_m(n)$是原始输入信号$x(n)$的最终IMF分量, $r_k(n)$是残差信号, 其中$c_{{\rm p}m}(n)$和$c_{{\rm q}m}(n)$分别代表处理后的最终正负模态信号, $r_{{\rm p}k}(n)$和$r_{{\rm q}k}(n)$分别代表处理后的最终正负残差信号.

SSWT作为一种高分辨率的时频分析算法, 继承了CWT理论, 对于一个信号(含噪声)$y(t)$, 其小波系数表示为:

$$W_y(a,b)=a^{-1/2}\int_{-\infty}^{\infty}y(t)\psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right){\rm d}t\,, \tag{5}$$

其中, $W_y(a,b)$是信号$y(t)$在尺度a ($a\in\mathbb{R}^+$)和平移(时移)值b ($b\in\mathbb{R}$)时的相应小波系数, $\psi(t)$是一个适当的母小波, $\psi^*(t)$代表$\psi(t)$的复共轭.

对信号$y(t)$的瞬时频率$\omega_y(a,b)$表示如下:

$$\omega_y(a,b)=-{\rm i}\,[W_y(a,b)]^{-1}\,\frac{\partial}{\partial b}W_y(a,b)\,, \tag{6}$$

其中i是虚部符号, 通过将时间尺度面的信息转移到时间频率面, 将频率变量ω和尺度变量a合并[14].

再将信号在连续频率域的一段频率范围压缩为离散频率域的一个点, 通常, 在同步挤压操作中, $W_y(a_z,b)$是信号$y(t)$在第z个离散标度值a_z处计算出来的. 这是第z个离散标度值对应的小波系数, 此时的瞬时频率是w_l.

$$T_y\left(\omega_l,b\right)=(\Delta\omega)^{-1}\sum_{a_z}W_y\left(a_z,b\right)a_z^{-3/2}(\Delta a)_z\,, \tag{7}$$

其中$T_y(\omega_l,b)$表示在连续区间$[\omega_l-1/2\omega,\omega_l+1/2\omega]$挤压得到的离散角频率$\omega_l$所对应的能量值, $(\Delta a)_z$

$= a_z - a_{z-1}$、$\Delta\omega = \omega_l - \omega_{l-1}$、$a_z$: $|\omega_y(a_z, b) - \omega_l| \leqslant \Delta\omega/2$.

最后, 通过逆CWT运算, 可以得到原始信号有$y(t)$, 如下所示:

$$\begin{cases} y(t) = \mathrm{Re}\left[C_\psi^{-1} \sum_l T_y(\omega_l, t)\,\Delta\omega\right], \\ C_\psi = \dfrac{1}{2}\displaystyle\int_0^\infty \hat{\psi}^*(\xi)\frac{\mathrm{d}\zeta}{\zeta}, \end{cases} \tag{8}$$

其中Re表示实部, ζ是尺度变量, ξ是频率域符号, $\hat{\psi}$是母小波$\psi(t)$的傅里叶变换, C_ψ是归一化常数[15].

2.2　CEEMD-SSWT算法流程

MCA (Morphological Component Analysis)的主要思想是利用信号不同成分之间的差异对信号进行分离. 由于信号是由形态不同的多个分量线性组合而成, 每个分量都能找到一个字典, 该字典只能稀疏表示对应的形态分量, 而无法稀疏表示其他分量, 所以这种类内稀疏而类间不相干的分模式表征这种思想与自适应滤波算法相似.

图1是CEEMD-SSWT算法提取Rieger-type平均周期的流程图, 分别对南北半球太阳黑子面积原始数据进行插值再用CEEMD算法进行模态分解, 通过傅里叶频谱选定Rieger-type周期信号所对应的频谱, 去除无用信号如黑子数据的噪声和非Rieger-type信号所在的频谱模态. 然后通过SSWT对得到的有用信号再次进行频段筛选, 在这两个步骤中, 两个算法分别进行模态分解和频率筛选的同时也可达到去除信号噪声的目的[16–17]. 由于SSWT对信号筛选重构的精度与原始数据的复杂程度有关, 所以本文需要先通过CEEMD筛选出可用信号以减少SSWT处理数据的难度, 最后再通过SSWT重构Rieger-type信号.

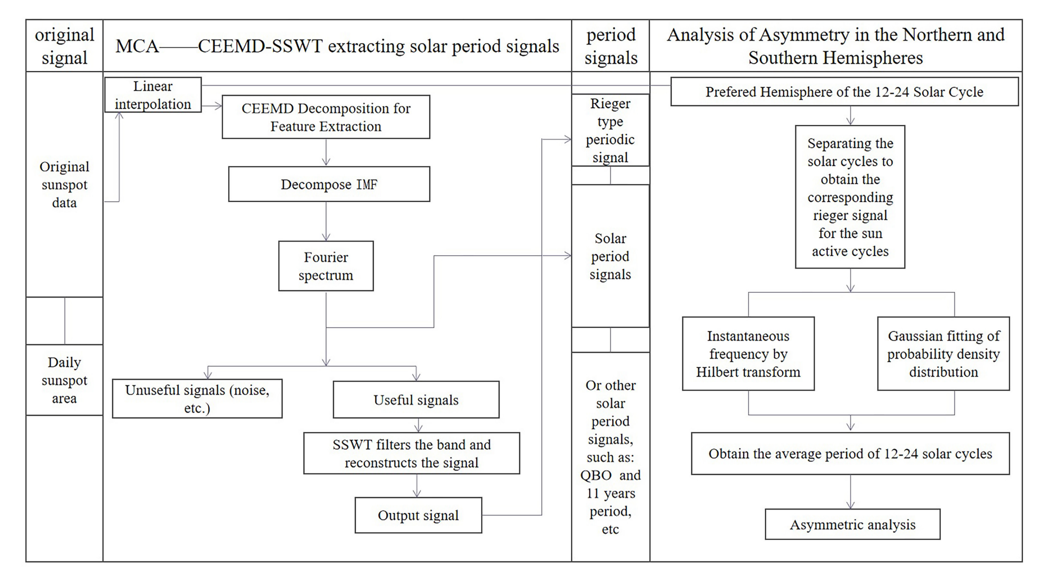


图 1　CEEMD-SSWT提取Rieger-type周期信号及其平均周期的流程图

Fig. 1　Flow chart of CEEMD-SSWT extraction of Rieger-type periodic signal and its average period

3 实验结果和分析

3.1 模拟信号测试

为验证通过MCA思想结合CEEMD-SSWT方法相对直接使用SSWT提取特定频段信号方法的优势, 我们通过构造模拟信号测试两者的重构能力: 首先构建一个频率分别为12、14、16、18和20 Hz的正弦信号, 然后添加频率为21、23、25和27 Hz以及频率为1000 Hz的高频余弦信号, 最后添加信噪比为3的高斯白噪声, 得到复合信号1, 如图2 (a)所示, 之后将复合信号里的所有正弦信号相加得到复合信号2, 如图2 (b)所示. 已知的复合信号2用于测试SSWT和CEEMD-SSWT对信号固定频段的筛选重构能力; 将复合信号2作为已知的测试信号, 通过上述两个方法对复合信号1进行处理, 通过将所提取出的信号与原始的复合信号2进行残差对比, 可以判断出哪种方法可以更准确地重构出复合信号2.

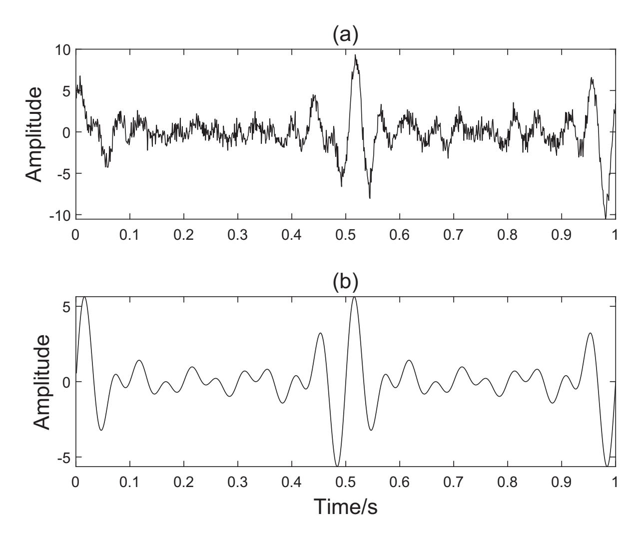


图 2 (a)加噪后的合成信号, 复合信号1; (b)用于判断SSWT和CEEMD-SSWT重构能力的已知测试信号, 复合信号2.

Fig. 2 (a) The composite signal after adding noise, composite signal 1; (b) Known test signals used to determine the reconstruction ability of SSWT and CEEMD-SSWT, composite signal 2.

两种方法对测试信号的提取如图3所示, 分别是SSWT和CEEMD-SSWT对复合信号1进行处理并提取测试信号后进行残差对比的结果. 图3 (a)和图3 (b)可以明显看出两个方法对复杂信号都不能精确重构, 两个算法在中间重构误差较小, 但在信号边缘由于算法自身的局限性会导致较大的重构偏差. 图3 (c)点划线、点线分别代表了MCA思想结合的CEEMD-SSWT方法提取测试信号的残差和SSWT提取测试信号的残差. 由图3 (c)中两个算法的残差对比可以看出, CEEMD-SSWT对信号的重构残差要小于SSWT, 且在图上方框处都可以看出CEEMD-SSWT的重构精度要高于SSWT.

3.2 数据集

太阳黑子面积是太阳活动的重要指标, 提供了关于太阳活动强度和变化的不同方面的信息. 在数据选择方面, 我们选用的是格林威治皇家天文台1874—2016年的日太阳黑子面积数据.

3.3 实际数据实验和结果分析

首先对数据进行预处理, 因为早期的太阳黑子数据可能会丢失, 为了防止结果不准确, 采用线性插值法对丢失的太阳黑子数据进行插值. 得到插值后的原始数据图像如图4所示.

通过(9)式对太阳活动的主导半球进行判断, 将每年的日太阳黑子数据进行统计得到各个太阳活动周的太阳活动强度的不对称性, 不对称性通过下式计算:

$$A = (N - S)/(N + S)\,, \qquad (9)$$

其中A表示南北半球不对称性强度, N表示北半球太阳活动数值, S表示南半球太阳活动数值.

图5是太阳半球活动强度的不对称性图, 其中波形表示12–24太阳活动周的每一年的总的太阳活动强度, 由格林威治皇家天文台1874—2016年的年太阳黑子面积数据得来. 中间的线表示南北半球的不对称度为0, 圆圈点是每年南北半球活动强度的不对称性的剧烈程度, 离线越远表示当年太阳南北半球活动强度的不对称性越强, 反之越弱. 由此可以看出, 在大部分太阳活动周里, 南北半球的不对称性在极大期期间相对较弱, 而在上升期和下降期会展现出更强的不对称性.

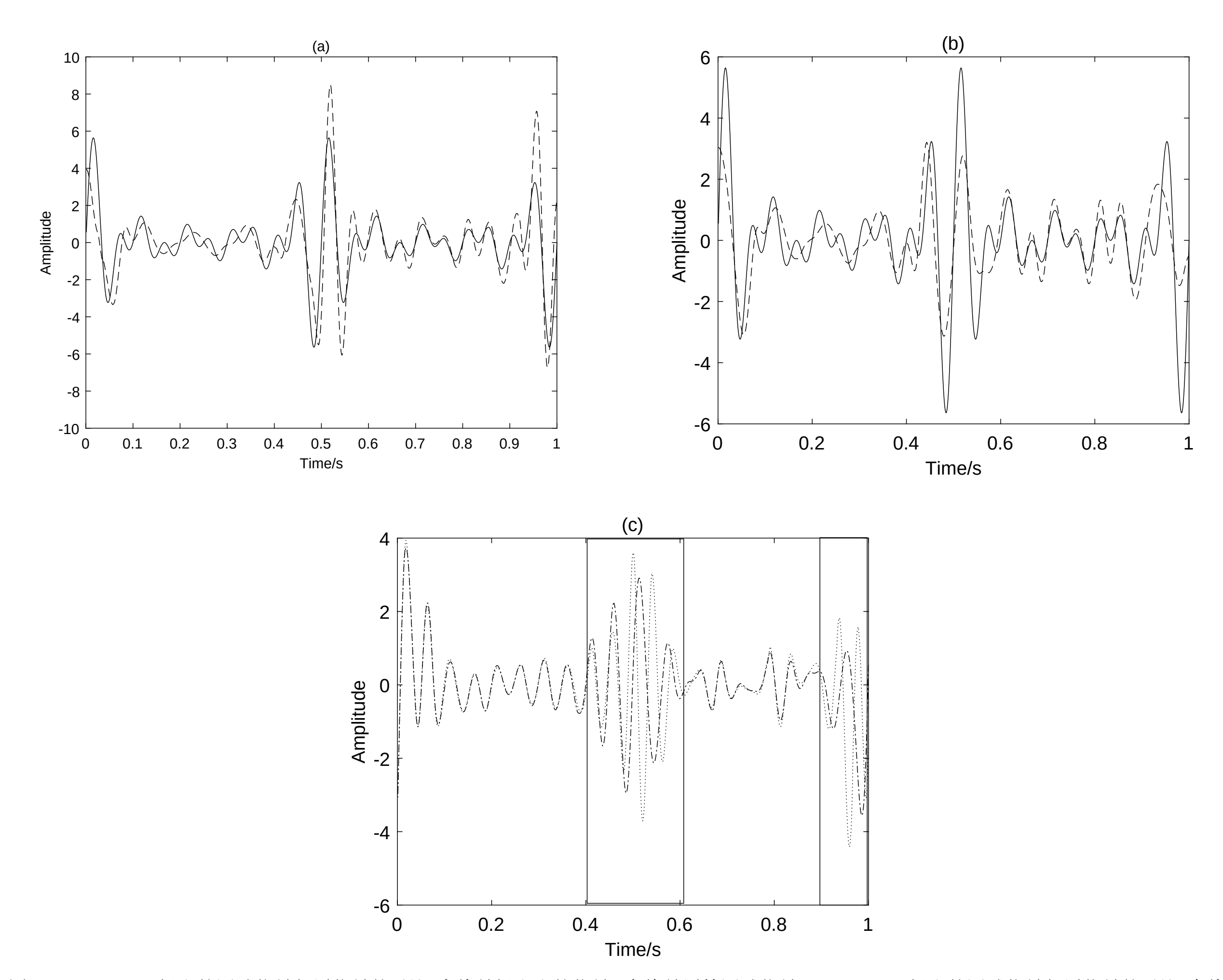


图 3 (a) SSWT提取的测试信号与原信号的对比(虚线是提取出的信号, 实线是原始测试信号); (b) MCA提取的测试信号与原信号的对比(虚线是提取出的信号, 实线是原始测试信号); (c) SSWT提取的测试信号与MCA提取的测试信号的残差对比(点划线是MCA, 点线是SSWT).

Fig. 3 (a) Comparison between the test signal extracted by SSWT and the original signal (dashed line represents the extracted signal, solid line represents the original test signal); (b) Comparison between the test signal extracted by MCA and the original signal (dashed line represents the extracted signal, solid line represents the original test signal); (c) Comparison of residual between the test signal extracted by SSWT and the test signal extracted by MCA (dot-dashed line represents MCA, dotted line represents SSWT).

同时通过上述(9)式太阳黑子数据进行主导半球的计算, 如表1, 对黑子数据的统计得出了12–24太阳活动周的主导半球. 可以看出在A值较大的活动周, 比如19、20活动周, 在图5中所表现出的每年的数据点也更远离横线.

同时, 可以看出并非是活动更强的太阳活动周, 其南北半球活动的不对称性就越强, 如17、18活动周的太阳活动强度远远大于早期太阳活动周, 但其南北不对称性却很弱, 但19、20活动周, 不仅南北不对称性很强, 其活动周内的太阳活动也很强烈.

图6是CEEMD对原始黑子信号进行提取得到的南北半球的模态信号, 其中图6 (a)是北半球, 图6 (b)是南半球. 算法过程是对整个12–24太阳活动周的南北半球太阳黑子数据进行CEEMD分解获得的各个IMF 信号, 根据频率由大到小从上到下是IMF1–IMF14. 由于黑子数据的复杂性, 每个IMF并

不能完全代表相应的太阳周期信号, 但CEEMD拥有较强的抗模态混叠和抗噪声的能力, 图7中的频谱图也可以看出所分解出的IMF还是几乎可以囊括所有太阳周期的.

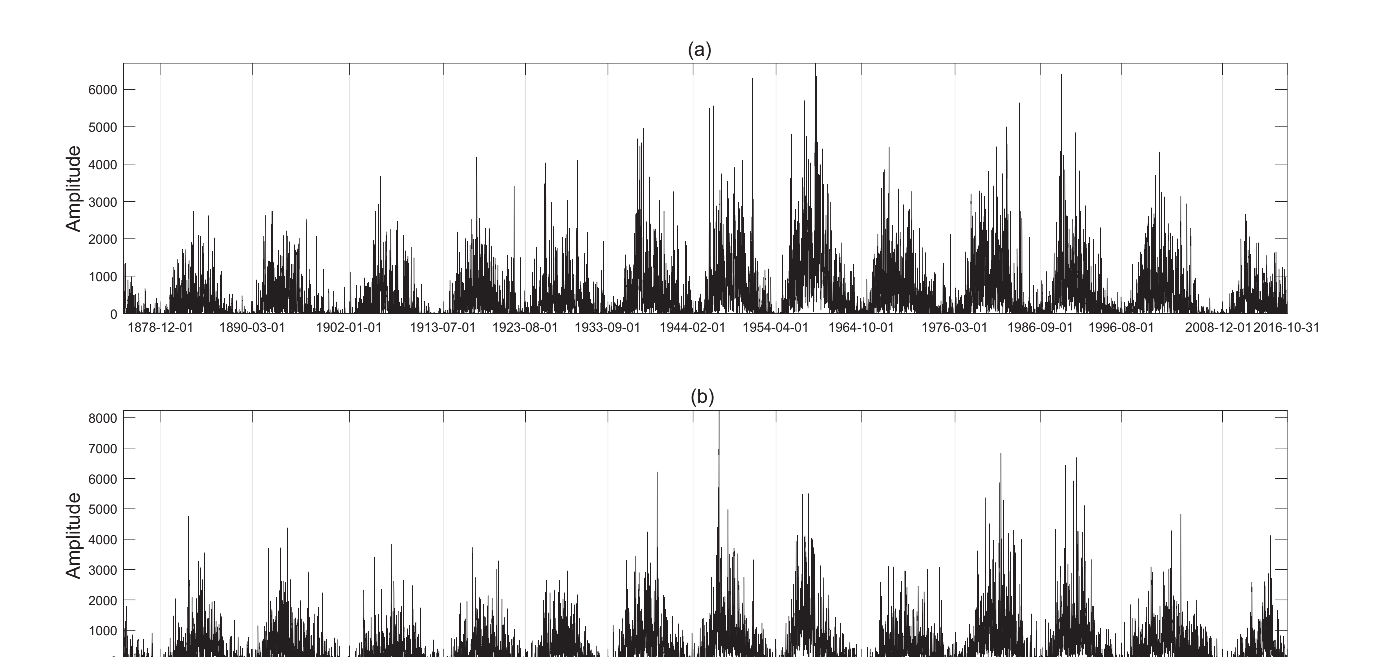


图 4 (a)在12–24太阳活动周中北半球太阳黑子面积数据; (b)在12–24太阳活动周中南半球太阳黑子面积数据.

Fig. 4 (a) Northern Hemisphere Sunspot area data during the 12–24 solar cycle; (b) Southern Hemisphere Sunspot area data during the 12–24 solar cycle.

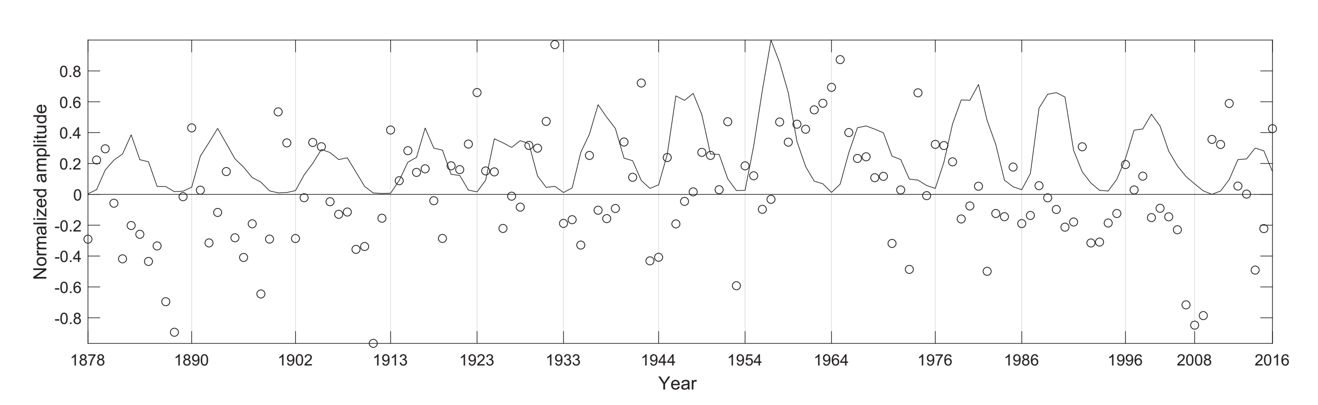


图 5 在12–24太阳活动周太阳南北半球活动强度的不对称性

Fig. 5 Asymmetry of activity intensity in the Northern and Southern Hemispheres of the Sun during the 12–24 solar cycle

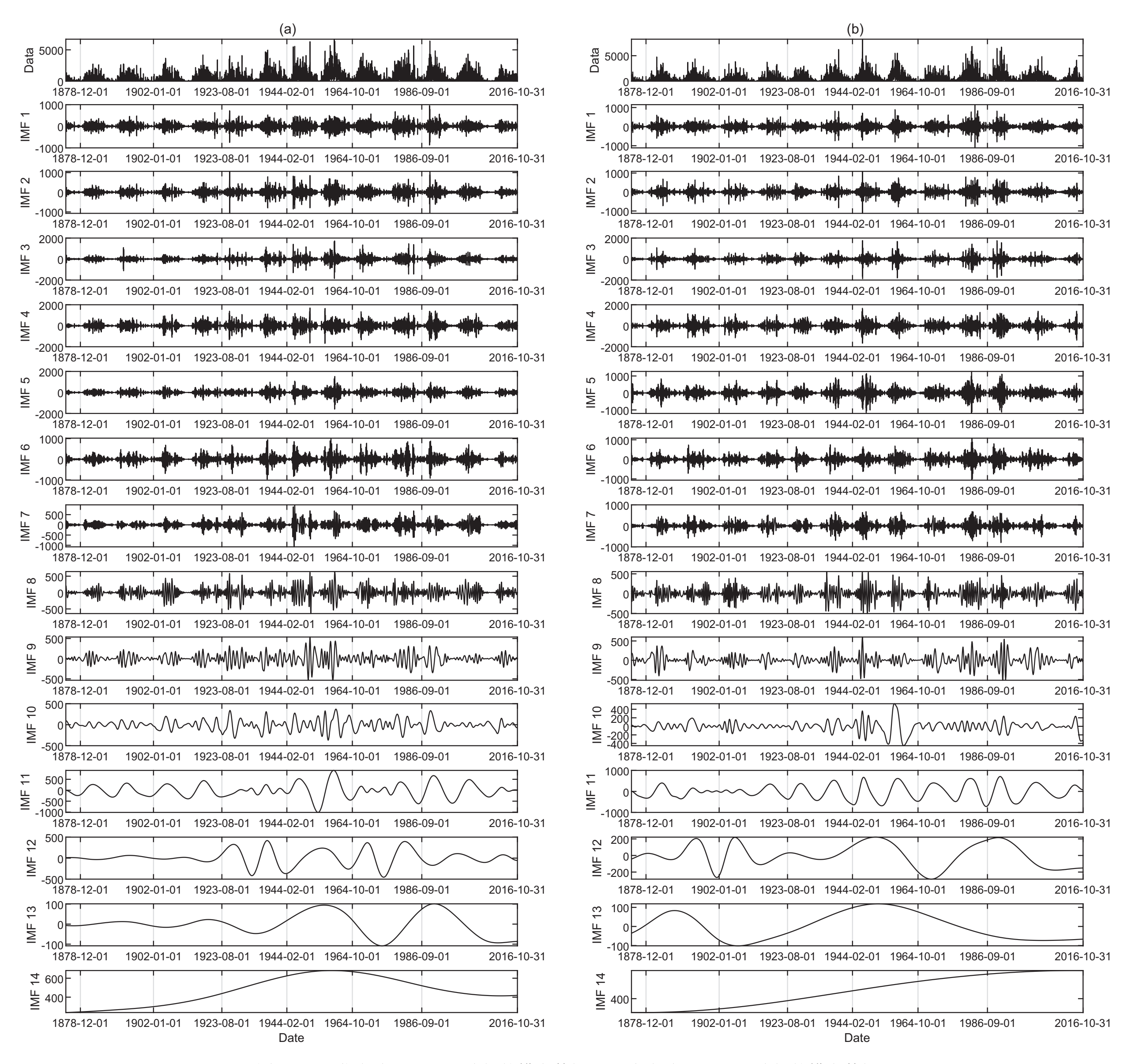


图 6 (a)北半球CEEMD分解的模态数据; (b)南半球CEEMD分解的模态数据.

Fig. 6 (a) Mode data of CEEMD decomposition in the Northern Hemisphere; (b) mode data of CEEMD decomposition in the Southern Hemisphere.

图7是分别对图6中的IMF进行傅里叶变换得到每一个IMF的频谱图, 其中图7 (a)是北半球, 图7 (b)是南半球. 从中可以明显看出IMF1和IMF2是天文信号里的高频噪声, 可以看出IMF7和IMF8的主要频率分布在0.004–0.01 Hz之间, 这其实就是Rieger-type信号所在的频率范围. 除了代表Rieger-type周期的IMF7、IMF8之外, 还有其他代表太阳周期的IMF, 如代表太阳活动的11 yr周期IMF11[18–19], 太阳自转引起磁场结构旋转造成的27 d周期是IMF4[20–21]. 还有1.2–3.5 yr的双准年周期(Quasi-Biennial Oscillation) IMF8、IMF9、IMF10[22–23]. 但正由上述所说CEEMD算法的局限性, 模态分解得不够彻底, 才会导致例如IMF8中既含有不少的Rieger-type信号频段又含有QBO周

期的频段.

所以通过模态分解的方式提取太阳周期信号这种方式也存在着极大的局限性, 在过去的文献中也有通过同步挤压变换(Synchrosqueezed Transform)对威尔逊山地磁指数数据进行模态分解[10], 从而提取其太阳周期信号的研究. 但模态分解的方式始终还是会存在模态混叠和噪声的影响, 所以为了避免模态混叠特别是一个模态信号难以表示全部Rieger-type周期信号, 需要将所分解出的模态进行挑选重组, 并使用SSWT进行频段筛选, 使提取出的信号频率更集中于Rieger-type周期信号频段.

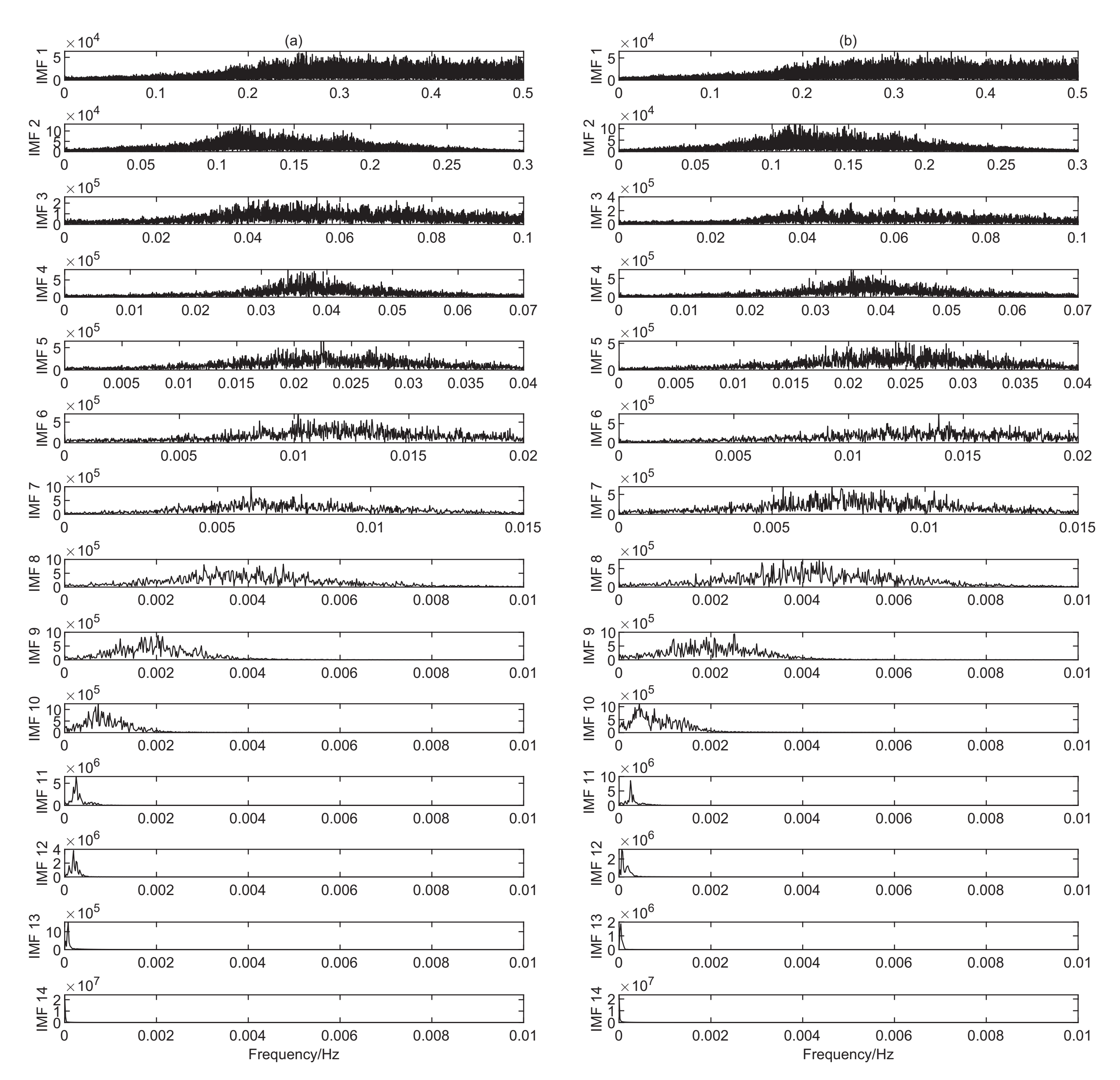


图 7　(a)北半球IMF的频谱数据; (b)南半球IMF的频谱数据.

Fig. 7　(a) Spectrum data of Northern Hemisphere IMF; (b) spectrum data of Southern Hemisphere IMF.

表 1 12–24太阳活动周的主导半球

Table 1 Preferred Hemisphere of the 12–24 solar cycle

Cycle	N	S	A	Preferred Hemisphere
12	871733	1251700	−0.1789	S
13	1181845	1441747	−0.0991	S
14	1065431	1011054	0.0261	N
15	1320789	1086174	0.0974	N
16	1416146	1186890	0.0881	N
17	1827965	1814989	0.0036	N
18	2258399	2136155	0.0278	N
19	3215637	2250399	0.1766	N
20	2100636	1480356	0.1732	N
21	2286171	2372951	−0.0186	S
22	1942387	2208031	−0.0641	S
23	1709866	1965125	−0.0695	S
24	844989	907537	−0.0357	S

将由图7频谱中选出的IMF7、IMF8合成来提取Rieger-type周期信号, 结果如图8所示, 其中图8 (a)和图8 (b)是利用CEEMD提取出的有用信号, 图8 (c)和图8 (d)是将两个半球的有用信号进行SSWT频段筛选得到的Rieger-type信号. 将频段筛选区间设定为0.0034–0.008 Hz, 也就是对应周期125–300 d的信号从而得到Rieger-type周期信号如图8 (c)–(d)所示. 在图9中, 再次通过傅里叶变换分别对图8中的北半球和南半球所代表的有用信号和Rieger-type周期信号进行时频变换, 分别得到相应的频谱图. 可以明显看出由SSWT重构出的Rieger-type信号在125–300 d也就是对应频率0.0034–0.08 Hz区间信号的频率更加集中, 而频段区间之外的信号被删除. 综上所述, CEEMD-SSWT算法对具有Rieger-type信号特征的模态进行合成, 突出Rieger-type信号, 减小有用信号处理的复杂度, 这也就提高了重构Rieger-type信号的精准度.

接下来将得到的13个太阳活动周的Rieger-type信号进行平均周期的提取[24], 通过希尔伯特变换得到相应活动周Rieger-type信号的瞬时频率后, 将所得Rieger-type信号的瞬时频率出现的概率进行分布统计, 并删去其中一些因为模态混叠和奈奎斯特噪声产生的异常值, 再进行高斯拟合得到各个活动周的平均周期, 如图10所示.

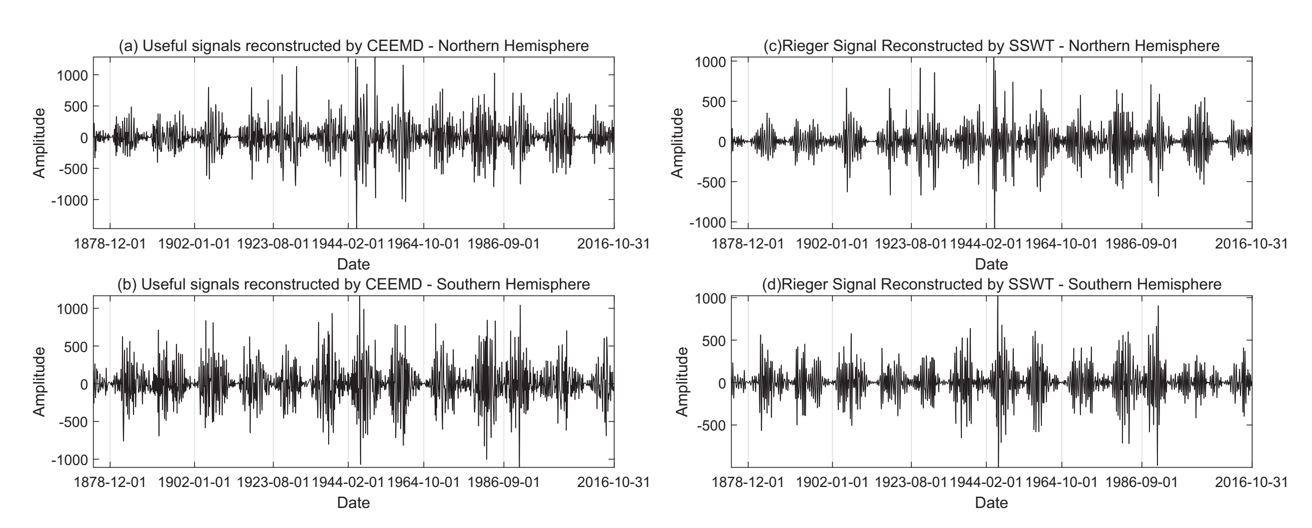


图 8 CEMMD-SSWT提取出的12–24太阳活动周的Rieger-type周期信号

Fig. 8 Rieger-type signal extracted by CEMMD-SSWT during the 12–24 solar cycle

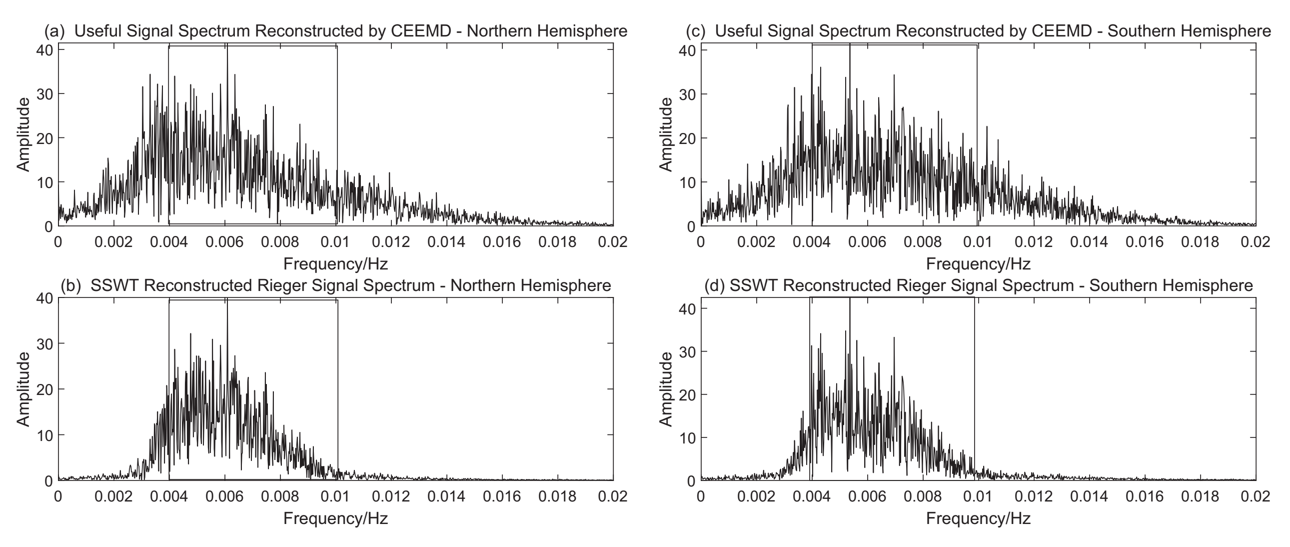


图 9　有用信号与Rieger-type信号的频谱对比图

Fig. 9　Spectral comparison between useful signals and Rieger-type signals

近期的研究发现, 在19–23太阳活动周中, 主导半球的平均周期会偏小[25]. 表2是通过上述数学方法分别对这13个活动周的Rieger-type周期信号进行平均周期提取得到的统计表. 在表2中, N-AP和S-AP分别代表在北半球和南半球的Rieger-type信号在相应活动周的平均周期. 通过CEEMD-SSWT所提取出的Rieger-type周期的平均周期的结果并非完全与小波分析所得出的结果一致, 这是由于提取周期特征方法上的区别而导致的差异. 同时因为小波分析的局限性, 会导致不能完全得到每个太阳活动周的平均周期, 同时由于太阳信号的复杂性, 容易使得Rieger-type周期信息在功率谱上不够突出, 从而导致得到的平均周期也不够准确, 甚至会出现平均周期“不存在”的情况, CEEMD-SSWT能够通过信号提取的方法得到各个活动周的Rieger-type周期, 从而得到每个活动周的平均周期.

通过CEEMD-SSWT对太阳黑子面积和太阳黑子数拟合处理所得出的平均周期是相近的, 但小波分析所得出的数据差异较大, 此处也体现智能算法处理信号提取特征的稳定性. 同时, 小波分析所用的CWT对原始信号进行处理得到的小波系数也会由于CWT的局限性导致的小波系数不准确的问题. 同时在突出周期性信号功率谱时, 也会受CWT的局限, 例如应该突出的功率谱没突出, 不应该存在于Rieger-type信号频段的功率谱却被突出了, 最终导致小波分析得到Rieger-type信号平均周期尺度与CEEMD-SSWT所得到的Rieger-type信号平均周期尺度及其规律上的差异.

通过SSWT对有用信号进行了处理, 重构出了所需的Rieger-type周期信号, 在这个过程中考虑Rieger-type周期信号的弹性尺度区间设置的频率重构区间为125–300 d, 这是一个很大的频率区间, 频率区间的设置十分影响最终结果. 设置125–300 d这个区间是多次实验后的结果, 既能去除一定程度上不属于Rieger-type信号的信息, 又保证所得最终南北半球平均周期尺度是处于150–180 d这个Rieger-type信号区间. 若只是将删选区间设置为150–180 d的确会存在超过这个区间的Rieger-type信号没被重构出来, 但是设置的是125–300 d这个较大区间, 很大程度上保证了Rieger-type信号信息的完整性, 同时也筛去许多非Rieger-type信号.

综上所述, 虽然Rieger-type信号南北半球平均周期的差别不大, 但是也存在着统计上的差别.

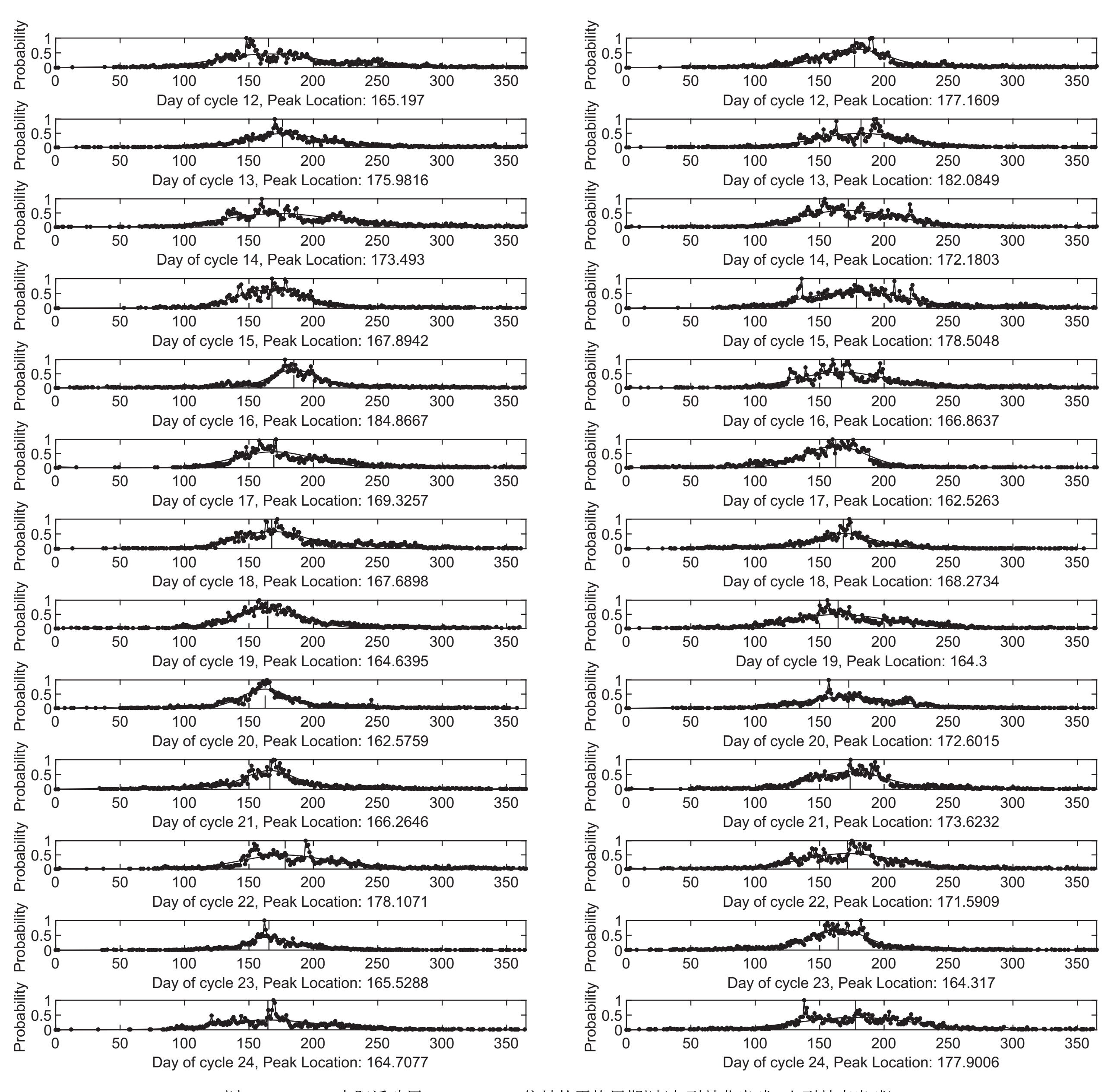


图 10　12–24太阳活动周Rieger-type信号的平均周期图(左列是北半球, 右列是南半球)

Fig. 10　Average periodic diagram of Rieger-type signal of 12–24 solar variation cycle (left column is the Northern Hemisphere, right column is the Southern Hemisphere)

由CEEMD-SSWT所得到的平均周期可以看出, 平均周期的大小和太阳活动的强度无关, 在太阳活动强的活动周会有很大的平均周期, 也可能会有小的平均周期, 同时南北半球的平均周期也与南北半球的活动强度并无关系, 这可能表示太阳活动在南北半球独立发展. 此结果同样在QBO周期中有所表现[26].

所以南北半球活动强度的不对称性也与其Rieger-type周期信号的平均周期大小无明显关系, 与两个半球Rieger-type信号的平均周期尺度无明

显相关性.

表 2 12–24太阳活动周的Rieger-type信号的平均周期
Table 2 Average period of Rieger-type signal of 12–24 solar cycle

Cycle	N-AP	S-AP	Difference
12	167	177	10
13	174	184	10
14	172	173	1
15	167	178	11
16	185	168	17
17	171	163	8
18	167	168	1
19	167	163	4
20	161	172	11
21	171	175	4
22	181	171	10
23	166	164	2
24	167	173	6
Average	170.46	171.46	

在将相应的Rieger-type信号提取出来后, 在南北半球上分别提取相应的代表太阳活动的11 yr周期信号, 图11、12分别是将所提取出的半球11 yr周期信号和Rieger-type周期信号进行归一化后的对比, 其中图11是北半球黑子数据, 图12是南半球黑子数据. 11 yr周期信号是由CEEMD对原始太阳数据进行模态分解出的IMF11, 由于11 yr周期信号的周期区间过大, 对应SSWT所需的频率区间极其小, SSWT难以准确重构11 yr周期信号, 所以CEEMD所分解出的11 yr周期会存在由于算法上的局限性而导致的不准确, 例如在南半球的13、14太阳活动周.

同时, 通过提取南北半球的11 yr周期和Rieger-type周期进行比较, 得到图11与图12. 由图中可以看出Rieger-type在大部分太阳活动周中都出现在极大期附近. 在北半球上, 第12、14、15、19、20、21、23和南半球的12、17、18、19、20、21、22太阳活动周的Rieger-type周期活动极值点都在极大期附近, 且Rieger-type周期往往是在太阳活动的上升期开始, 太阳活动的下降期结束, 随着太阳活动变得剧烈而剧烈. 但有些太阳活动周内, Rieger-type周期呈现出多个峰值, 往往这些峰值出现在太阳活动的上升期和下降期, 例如在北半球的13、16、18、22和南半球的15、20太阳活动周内, Rieger-type周期呈现多次起伏波动, 甚至在南半球的20、23活动周, Rieger-type周期分别在太阳活动的上升、极大、下降期多次出现幅值波动.

综上所述, Rieger-type周期通常出现在太阳活动的极大期附近, 但在某些活动周中Rieger-type周期会呈现多次波动, 也会出现在太阳活动的上升期或下降期.

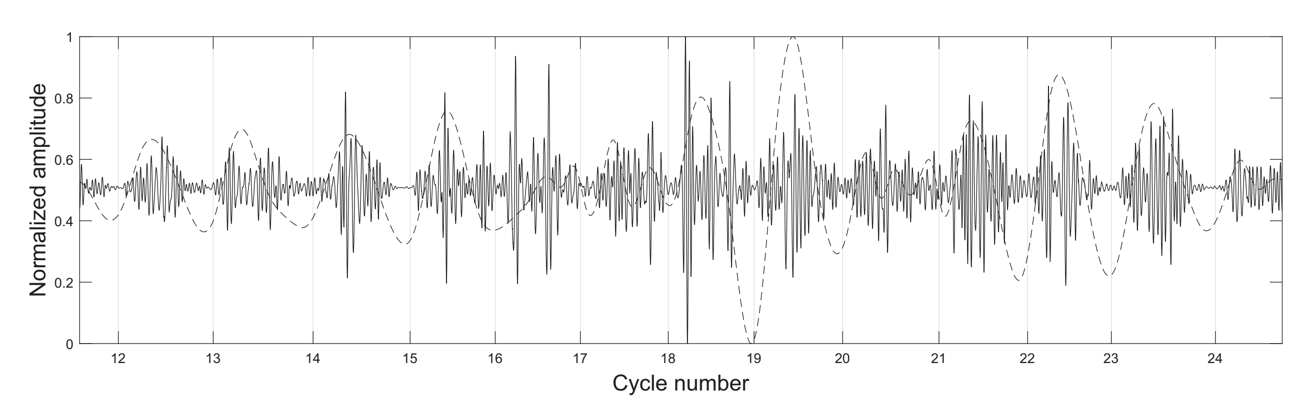


图 11 北半球上的Rieger-type周期和11 yr周期(虚线代表11 yr周期信号, 实线表示Rieger-type周期信号)

Fig. 11 The Rieger-type period and 11-year period in the Northern Hemisphere (dashed line represents 11-year period signal, solid line represents Rieger-type period signal)

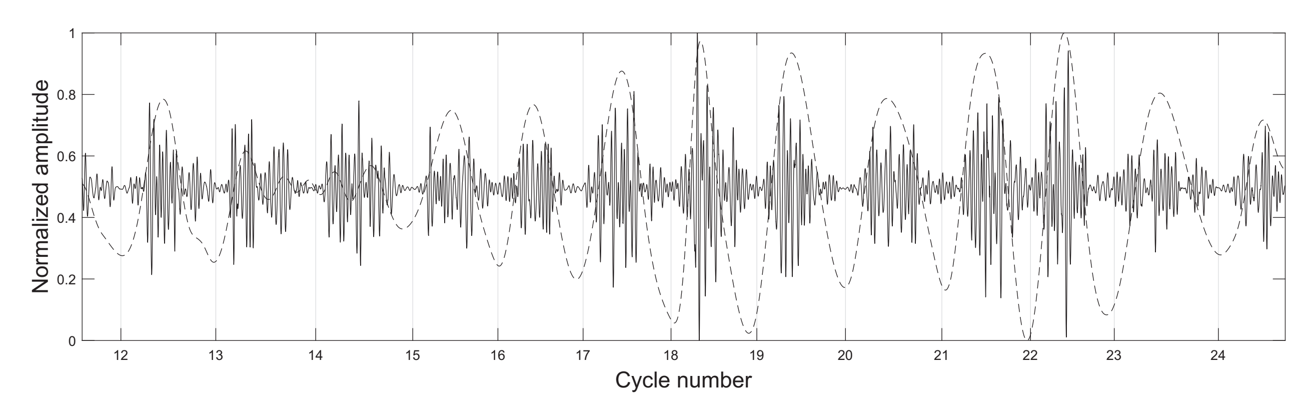


图 12 南半球上的Rieger-type周期和11 yr周期(虚线代表11 yr周期信号, 实线表示Rieger-type周期信号)

Fig. 12 The Rieger-type period and 11-year period in the Southern Hemisphere (dashed line represents 11-year period signal, solid line represents Rieger-type period signal)

4 结论

在本文中, 我们通过使用CEEMD-SSWT方法处理12–24太阳活动周的日太阳黑子面积数据, 更精确地提取了太阳周期信号中的Rieger-type周期信号. 分析了太阳南北半球活动的不对称性, 得到以下结论:

(1)虽然整个北半球的活动强度要高于南半球, 但其整个13个活动周的Rieger-type周期信号的平均周期却是极其相近的;

(2)南北半球的不对称性在大部分活动周内的极大期显得较弱, 在上升或下降期显得较强;

(3)太阳南北半球Rieger-type信号的平均周期也与其活动强度没有很大的相关性, 并非活动强度剧烈的周期或半球, 其Rieger-type信号的平均周期就一定长或短;

(4) Rieger-type周期通常出现在太阳活动的极大期附近, 但在某些活动周中Rieger-type周期会呈现多次波动, 也会出现在太阳活动的上升期或下降期.

参 考 文 献

[1] Cowling T G. MNRAS, 1934, 94: 768
[2] Rieger E, Share G H, Forrest D J, et al. Nature, 1984, 312: 623
[3] Chowdhury P, Choudhary D P, Gosain S, et al. Ap&SS, 2015, 356: 7
[4] Gurgenashvili E, Zaqarashvili T V, Kukhianidze V, et al. ApJ, 2016, 826: 55
[5] Torrence C, Compo G P. BAMS, 1998, 79: 61
[6] Lomb N R. Ap&SS, 1976, 39: 447
[7] Chowdhury P, Choudhary D P, Gosain S. ApJ, 2013, 768: 188
[8] Xiang N B, Zhao X H, Li F Y. PASA, 2021, 38: e032
[9] Singh P R, Tiwari C M, Saxena A K, et al. Ap&SS, 2019, 364: 1
[10] Feng S, Yu L, Wang F, et al. ApJ, 2017, 845: 11
[11] Hu X, Peng S, Hwang W L. ITSP, 2011, 60: 1075
[12] Huang N E, Wu Z. RvGeo, 2008: 46
[13] Imaouchen Y, Kedadouche M, Alkama R, et al. MSSP, 2017, 82: 103
[14] Daubechies I, Lu J, Wu H T. ACHA, 2011, 30: 243
[15] Thakur G, Brevdo E, Fukar N S, et al. SP, 2013, 93: 1079
[16] Yeh J R, Shieh J S, Huang N E. ADSAA, 2010, 2: 135
[17] 沈微, 陶新民, 高珊, 等. 振动与冲击, 2018, 37: 239
[18] Chowdhury P, Khan M, Ray P C. Ap&SS, 2010, 326: 191
[19] Deng L H, Li B, Xiang Y Y, et al. JASTP, 2015, 122: 18
[20] Mursula K, Zieger B. J. JGR: Space Physics, 1996, 101: 27077
[21] Bai T. ApJ, 2003, 591: 406
[22] Vecchio A, Carbone V. A&AC, 2009, 502: 981
[23] Bazilevskaya G, Broomhall A M, Elsworth Y, et al. SS-Rv, 2014, 186: 359
[24] 刘伟行, 钱雅文, 邓林华, 等. 天文研究与技术, 2019, 16: 151
[25] Gurgenashvili E, Zaqarashvili T V, Kukhianidze V, et al. ApJ, 2017, 845: 137
[26] Badalyan O G, Obridko V N. NewA, 2011, 16: 357

Asymmetry Analysis of Solar Northern and Southern Hemisphere Rieger-type Period Based on CEEMD-SSWT

LU Xuan[1] XUE Ya-juan[1] DENG Lin-hua[2]

(1 School of Communication Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610200)
(2 School of Mathematics and Computer Science, Yunnan Minzu University, Kunming 650000)

Abstract CEEMD (Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition) is an adaptive filtering algorithm proposed in recent years, and SSWT (Synchrosqueezed Wavelet Transform) is a current high-resolution time-frequency analysis algorithm. In this paper, CEEMD is used to pre-filter the sunspot daily area data, and then SSWT is used to analyze the Rieger-type period asymmetry of the northern and southern hemispheres to achieve a more accurate extraction of the solar period signal. The results show that: (1) although the intensity of activity is higher in the Northern Hemisphere than in the Southern Hemisphere as a whole, the mean period scales of the Rieger-type period signal for the entire 13 active cycles of the two hemispheres are extremely similar. (2) There is a clear asymmetry in the intensity of solar activity between the northern and southern hemispheres, but during most of the active weeks, the period of maximum solar activity is also the period of weakest asymmetry between the northern and southern hemispheres. (3) There is no clear correlation between the intensity of solar activity and the mean period of the solar Rieger-type period signal, and it does not follow that the higher the intensity of activity, the smaller the mean period of the Rieger-type period signal in the corresponding hemisphere, and the lower the intensity of activity, the larger the mean period of the Rieger-type period signal in the corresponding hemisphere. (4) The Rieger-type period usually occurs near the maximum period of solar activity, but in some cycles the Rieger-type period shows multiple fluctuations and can also occur during periods of rising or falling solar activity.

Key words Sun: activity, Sun: spots, technology: CEEMD-SSWT